

灌水定额与土壤水分阈值协同下南疆膜下滴灌 棉花灌溉制度优化

孙岩颖^{1,2}, 李晓光³, 张宝忠², 彭致功^{1,2}, 李王成¹, 杨贵羽²,
魏征², 张晓涛², 门立雪², 任闰巳^{1,2}, 马帅豪²

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全
全国重点实验室, 北京 100038; 3. 聊城市位山灌区管理服务中心, 山东 聊城 252000)

摘要: [目的] 开展南疆棉花灌溉制度优化研究, 量化棉花各生育阶段土壤水分适宜阈值, 为传统农业向数字化农业转型提供核心参数支撑。[方法] 利用现状调研和不同灌溉水平下棉花生长与土壤水分变化过程的实测数据对 AquaCrop 模型进行参数化验证, 以此为基础开展灌水定额与适宜土壤水分阈值协同下的南疆棉花灌溉制度优化研究。[结果] 1) 棉花生育期生长状况与土壤含水率变化过程的模拟值与实测值之间的决定系数 >0.7 , 模型模拟精度达 82% 以上, 所以经校验的模型能较好模拟棉花生长与水分之间的响应关系。2) 以棉花各生育时段灌溉后土壤水分入渗主要分布在 0~0.6 m 土层且渗漏损失较小为原则, 研究确定南疆棉花膜下滴灌的适宜灌水定额为 36 mm。3) 提出与区域水资源紧缺状况相协调的优化灌溉制度, 其中在水资源紧缺情况下, 棉花蕾期、花铃期和吐絮期土壤水分下限宜分别为 60% 田间持水量 (FC)、65%FC、55%FC; 水资源紧缺状况适度改善后, 棉花蕾期、花铃期及吐絮期的土壤水分下限宜分别为 70%FC、75%FC、55%FC。[结论] 灌溉制度优化结果可为干旱区棉田精准灌溉和区域水资源高效利用提供理论与基础数据支撑。

关键词: 棉花; 膜下滴灌; AquaCrop 模型; 土壤水分下限

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0311-12

Optimization of Irrigation Schedule for Cotton under Mulched Drip Irrigation in Southern Xinjiang Based on Coordination of Irrigation Quota and Soil Moisture Thresholds

SUN Yanying^{1,2}, LI Xiaoguang³, ZHANG Baozhong², PENG Zhigong^{1,2}, LI Wangcheng¹, YANG Guiyu²,
WEI Zheng², ZHANG Xiaotao², MEN Lixue², REN Runsi^{1,2}, MA Shuaihao²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. State Key Laboratory of
Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
3. Weishan Irrigation District Management Service Center, Liaocheng, Shandong 252000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to optimize cotton irrigation schedules in southern Xinjiang, quantify the appropriate soil moisture thresholds for different growth stages of cotton, and provide core parameter support for the transformation from traditional agriculture to digital agriculture. [Methods] The parameters of the AquaCrop model were calibrated and verified using measured data of cotton growth and soil moisture dynamics under different irrigation treatments. Based on this, an optimization study of the cotton irrigation schedule in southern Xinjiang was conducted under the coordination of irrigation quota and appropriate soil moisture thresholds.

收稿日期: 2025-11-06

修回日期: 2025-12-19

录用日期: 2025-12-29

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-03-20

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1900504); 山东省重点研发计划 (2024CXGC010912); 新疆维吾尔自治区塔里木河流域管理局项目 (ID145B2021)

第一作者: 孙岩颖 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事作物高效用水研究。E-mail: sunyanyings@163.com

通信作者: 彭致功 (1975—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事作物高效用水研究。E-mail: pengzhg@iwhr.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

[**Results**] 1) The coefficient of determination (R^2) between the simulated and measured values of cotton growth status and soil moisture dynamics during the growth stages exceeded 0.7, and the model simulation accuracy reached over 82%. Therefore, the calibrated model could well simulate the response relationship between cotton growth and soil moisture. 2) Based on the principle that after irrigation at each growth stage, the infiltrated soil moisture was mainly distributed within the 0–0.6 m soil layer with minimal percolation loss, the appropriate irrigation quota for cotton under mulched drip irrigation in southern Xinjiang was determined to be 36 mm. 3) An optimized irrigation schedule coordinated with the regional water scarcity conditions was proposed. Under conditions of water scarcity, the lower limits of soil moisture for cotton at the bud, boll, and boll-opening stages should be 60% field capacity (FC), 65% FC, and 55% FC, respectively. When the water scarcity condition was moderately alleviated, the lower limits should be 70% FC, 75% FC, and 55% FC, respectively. [**Conclusion**] The optimized irrigation schedule can provide theoretical guidance and fundamental data support for precision irrigation of cotton in arid regions and the efficient utilization of regional water resources.

Keywords: cotton; mulched drip irrigation; AquaCrop model; lower limit of soil moisture

Received: 2025-11-06

Revised: 2025-12-19

Accepted: 2025-12-29

Online(www.cnki.net): 2026-03-20

中国新疆地处欧亚大陆中部,年降水稀少而蒸发量高,属于典型的大陆性干旱地区^[1]。新疆是我国最大的棉花生产基地,2023年棉花皮棉总产511万t,占全国总量的90%^[2]。南疆地区纬度较低,光热资源充足,昼夜温差大,降水稀少,有利于棉花生长和纤维形成^[3],南疆棉花种植面积超出全疆2/3^[4]。因受限于水资源短缺实际,南疆棉花正常生长与灌溉存在深度耦合关系^[5]。膜下滴灌技术结合地表覆盖与精准灌溉,可有效抑制土壤水分蒸发,减少渗漏损失,显著提升灌溉效率^[6],是新疆棉花主要的灌溉方式。新疆棉花灌溉制度优化通过精准调控水肥资源,对实现水资源高效利用、盐碱地改良及产量品质提升具有重要现实意义。

灌水定额与土壤水分下限阈值是灌溉制度优化的核心调控参数,二者通过作物需水规律、土壤质地和水资源效率形成动态匹配关系,共同决定灌溉时机与水量。在灌水定额方面,崔永生等^[7]结合南疆常规灌溉模式设置6种不同灌水定额,发现棉花产量随灌溉定额增加呈先升后降的趋势;范雅君等^[8]则通过设置不同灌水定额并调整玉米各生育期灌水次数以模拟水分亏缺,明确了玉米适宜定额范围及各生育期最优水量分配;杜江涛等^[9]基于棉花蒸发蒸腾量与降水量的日差值确定固定灌水定额,提出生育期297 mm为最优灌溉定额。在土壤水分下限阈值方面,苑蒙飞等^[10]通过设置番茄关键控水期不同水分下限阈值,得出番茄各生育期适宜灌水下限。HUANG等^[11]在微喷灌条件下,设定3种小麦花期后的适宜土壤水分下限,结果表明,小麦花期后60%FC的灌溉阈值可以促进土壤水分吸收和生物量积累,进而提

升产量。上述研究虽在单因素优化上取得进展,但研究的前提条件都是考虑现状天气条件,因天气变化具有随机性,现状天气条件难以在未来重现,导致研究成果的代表性不足;特别是在土壤水分下限阈值方面,未深入探讨水分下限与定额的协同效应。以往灌溉制度优化多以传统试验为主,存在耗时费力、处理情景有限、水分下限精度难以控制等问题,难以支撑多因素耦合的优化研究。作物生长模型整合作物遗传特性、环境因子及管理措施等,可实现对作物生理生态过程的全过程量化模拟,有利于揭示多因素交互过程的复杂机制,突破天气状况限制,能够解决典型年灌水定额与土壤水分下限阈值协同下的灌溉制度优化难题。

AquaCrop模型是由联合国粮食及农业组织(FAO)开发的作物生长模型,主要用于模拟作物对水分的响应和产量形成,并在作物灌溉管理、种植制度、未来气候情景等模拟中的应用已取得较好效果^[12-13]。因此,本研究将利用经验证的AquaCrop模型,研究不同灌水定额下膜下滴灌棉花滴灌湿润范围与棉花根系生长的互馈关系,并确定适宜的灌水定额;以此为基础,研究棉花各生育期不同土壤水分下限阈值下土壤水分动态与作物产量的响应机制,以棉花产量及水分生产率为多元目标确定棉花灌溉制度的最优解,为干旱区棉田精准灌溉提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验观测在2023年4月至2024年10月进行,在南疆塔里木灌区及其阿拉尔现代农业院士专家工作

站分别开展现状灌溉制度棉花生长状况调研与不同灌溉水平下棉花灌溉制度试验研究。试验区属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候,昼夜温差大,常年干旱少雨,地表蒸发强烈。多年平均降水量为 50 mm,年蒸发量约 2 200 mm,全年 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的有效积温约 4 000 $^{\circ}\text{C}$,无霜期 220 d 左右,近 5 a 平均地下水埋深为

4.74 m,土壤质地为砂壤土。新疆棉花种植模式以宽窄行和等行距为主,其中宽窄行应用面积广泛、产量较优^[14-15]。

试验期间的气象数据来自阿拉尔国家气象站,棉花生育期内的降雨量、最高气温、最低气温及参考作物腾发量(ET_0)见图 1。

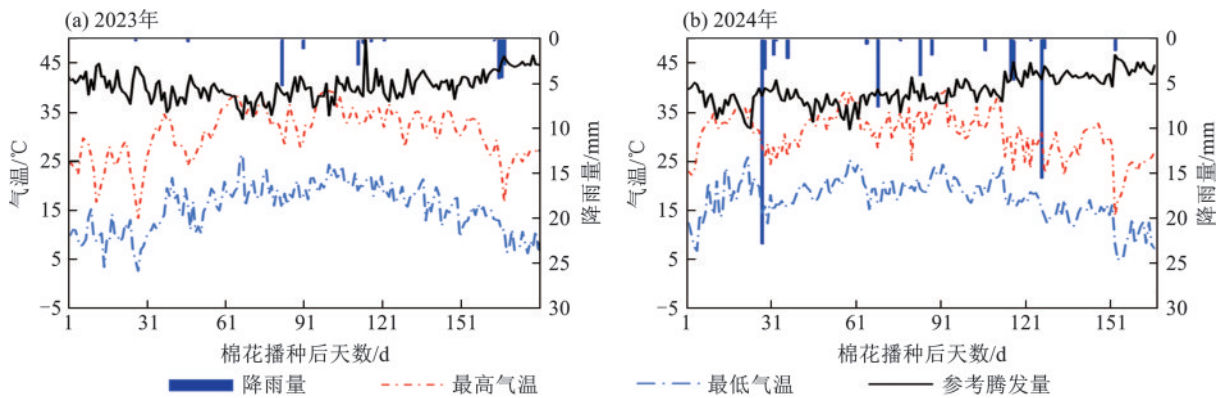


图 1 棉花生育期内气象数据
Fig. 1 Meteorological data during cotton growth stages

1.2 试验设计

1.2.1 棉花现状灌溉制度调研 2023 年在南疆塔里木灌区开展现状灌溉制度下棉花生长状况调研,选择灌溉定额差异比较大的 3 个代表性样点 S1、S2、S3,基本能代表该灌区田间灌溉量多寡情况。各样点棉花品种均为“塔河 2 号”,为南疆棉花主栽

品种;宽窄行配置 10 cm+66 cm+10 cm,滴灌带布置方式为一膜三带六行,膜宽 200 cm,膜间距 33 cm。S1、S2 与 S3 的播种日期分别为 4 月 7 日、4 月 15 日及 4 月 4 日,收获日期皆为 10 月 2 日。按照农户经验进行施肥与灌溉管理,各样点具体灌溉制度见表 1。

表 1 南疆现状灌溉制度
Table 1 Current irrigation schedule in southern Xinjiang

S1		S2		S3	
灌溉日期(月-日)	灌溉量/mm	灌溉日期(月-日)	灌溉量/mm	灌溉日期(月-日)	灌溉量/mm
06-17	47	05-31	38	06-03	44
06-24	43	06-09	38	06-12	44
07-01	33	06-17	48	06-20	44
07-10	33	06-26	38	06-28	36
07-18	33	07-03	38	07-07	36
07-24	33	07-12	38	07-15	44
07-30	28	07-20	38	07-22	36
08-05	28	07-28	38	07-31	36
08-13	33	08-04	38	08-08	36
08-20	43	08-12	38	08-16	36
		08-20	38	08-23	44
合计	354	合计	396	合计	472

1.2.2 不同灌溉水平下棉花灌溉制度试验 2024 年在阿拉尔现代农业院士专家工作站进行不同灌溉水平下棉花灌溉试验,设置 24、30、36、45 mm 等 4 个灌水定额,每个处理 3 次重复,共计 12 个小区,按照完全随机区组设计进行田间布置。试验小区长 14 m,宽 11 m,面积为 154 m²。供试棉花品种为“塔河

2 号”,本研究的种植模式与现状调研种植模式相同。因选择试验地为盐碱土,采用干播湿出方法易造成在棉种周围盐分聚集对出苗不利,为保证苗齐苗壮,采用覆膜春灌的非生育期盐分淋洗模式,洗盐定额为 80 m³/(667 m²)。棉花播种日期为 2024 年 4 月 30 日,收获日期为 10 月 12 日。播前施 50 kg/

(667 m²)磷酸二铵作为基肥;进入蕾期后随水滴施尿素及滴灌肥(N、P₂O₅和 K₂O 总养分量≥60%)。喷药管理及其他农艺措施参照当地经验,具体灌溉制度见表 2。

表 2 不同灌溉水平下棉花灌溉制度设计
Table 2 Cotton irrigation schedule design under different irrigation treatments mm

灌溉日期(月-日)	灌溉量			
	T1	T2	T3	T4
05-13	24	30	36	45
06-12	24	30	36	45
06-22	24	30	36	45
06-29	24	30	36	45
07-11	24	30	36	45
07-18	24	30	36	45
07-25	24	30	36	45
08-02	24	30	36	45
08-06	24	30	36	45
08-13	24	30	36	45
08-20	24	30	36	45
08-26	24	30	36	45
合计	288	360	432	540

1.3 观测指标及方法

采用烘干称重法每 10 d 测定土壤的质量含水率。冠层覆盖度(CC)代表冠层的发育程度。在小区选取 3 株代表性植株并标记,平均每 10 d 人工测量植株叶片的最大长度和宽度,结合种植密度以推求叶面积指数(LAI),尔后通过 LAI 计算 CC,具体计算公式为:

$$CC = 1.005 \times (1 - e^{-0.6LAI})^{1.2} \tag{1}$$

地上部生物量平均每 10 d 测量 1 次,在小区随机选择 3 株长势均匀的棉花,采用烘干法测定其干物重。在棉花吐絮率超过 90% 时,各小区随机选取 3 个 2.33 m×2.00 m 测产样方摘取棉花,经自然风干后称重,尔后折算为单位面积产量(Y)。

水分生产率(WUE)反映作物生产过程中的能量转化效率,其计算公式为:

$$WUE = Y / (10ET) \tag{2}$$

式中:Y 为籽棉产量,t/hm²;ET 为作物实际耗水量,mm。

1.4 AquaCrop 模型简介

AquaCrop 模型是一种针对干旱地区农作物水分利用效率进行模拟评估的模型,模型揭示作物水分响应机制,有助于制定水分亏缺条件下的灌溉制度;且模型所需输入参数少,通用性较强。通过生物量

和收获指数来模拟作物生产力水平,生物量是通过作物冠层及根系生长模拟获得,量化叶片衰老过程,减少因为叶面积指数等不确定性造成的误差。

1.5 灌溉制度情景方案制定

本研究设定棉花土壤水分下限阈值范围为蕾期 50%~70%FC、花铃期 65%~80%FC、吐絮期 55%~75%FC(FC 为田间持水量),以每次 5%~10% 的变化幅度确定不同生育期适宜的灌溉下限(表 3)。对各生育期设定土壤水分下限采用随机组合方法确定不同的灌溉制度情景,利用校验后模型模拟不同灌溉制度情景下的棉花生长动态,当根区土壤含水量下降到设定阈值时,且兼顾未来几天不会发生降水或大风情况下,按照设定灌水定额进行适时灌溉,在对灌溉时间、灌溉量及其产量等模拟结果相同情景进行合并后,最终得到 14 种有效灌溉制度情景方案。

表 3 不同生育期棉花灌溉制度情景中土壤水分下限
Table 3 Lower limit of soil moisture for cotton at different growth stages under irrigation schedule scenarios

生育期	土壤水分下限/%FC		
蕾期	50	60	70
花铃期	65	75	80
吐絮期	55	65	75

1.6 数据分析与模型评价

本研究的数据处理、分析与图表绘制均在 Excel 2021 软件中完成。为评价校验后模型模拟精度,采用决定系数(R²)、一致性系数(d)、均方根误差(RMSE)和标准均方根误差(NRMSE)对模型进行评价。R²和 d 越接近 1,RMSE 和 NRMSE 越小,说明模型模拟效果越好,数据越接近实测值。

2 结果与分析

2.1 模型校正与验证

为确保率定后模型能满足不同灌溉制度下棉花生长及土壤含水率变化过程的模拟需要,本研究利用 2024 年不同灌溉水平下各处理的冠层覆盖度、地上部生物量、土壤含水量及产量等实测数据对模型的参数进行率定,并利用 2023 年调研现状灌溉制度下棉花生长数据对模型的参数进一步验证,经调试后的参数值见表 4。

2024 年模型率定下棉花冠层覆盖度模拟情况分别见图 2 和表 5。不同处理棉花的冠层覆盖度变化的趋势基本相同,棉花在开始播种后至 40 d 内缓慢生长,随后进入快速生长阶段,逐渐达到最大值并趋于稳定,尔后随着植物的冠层逐渐衰老,冠层覆盖度逐渐降低。不同处理冠层覆盖度模拟值与实测值之间

的 R^2 、 d 、RMSE 和 NRMSE 分别为 0.93~0.97、0.88~0.91、3.58%~4.61% 和 3.91%~5.77%；所有处理的模拟值与实测值之间的 R^2 、 d 、RMSE 及 NRMSE 分别为 0.90、0.93、4.05% 和 4.69%，模型模拟误差较小，模拟值能反映冠层覆盖度在生育期内的变化过程。

表 4 校验后的模型参数
Table 4 Calibrated parameters of AquaCrop model

指标	基本参数	单位	系统默认值	参数率定值
温度阈值	最低生长温度(T_{base})	℃	12	10
	最高生长温度(T_{upper})	℃	35	35
冠层生长指标	冠层生长指数(CGC)		0.076 11	0.103 00
	冠层衰减系数(CDC)		0.029 17	0.090 00
	最大冠层覆盖度(CC _x)	%	98	95
作物蒸腾系数	作物系数(K_c)		1.10	1.15
根系生长参数	最小有效根系深度(Z_n)	m	0.30	0.10
	最大有效根系深度(Z_x)	m	2.00	0.65
水分胁迫影响参数	水分胁迫对冠层影响上限($P_{exp,upper}$)		0.20	0.35
	水分胁迫对冠层影响下限($P_{exp,lower}$)		0.70	0.65
	水分胁迫对气孔导度影响上限($P_{sto,upper}$)		0.75	0.35
	水分胁迫对早期冠层衰老影响上限($P_{sen,upper}$)		0.75	0.60
产量形成参数	标准水分生产力(WP)	g/m ²	15	18
	参考收获指数(HI ₀)	%	35	42

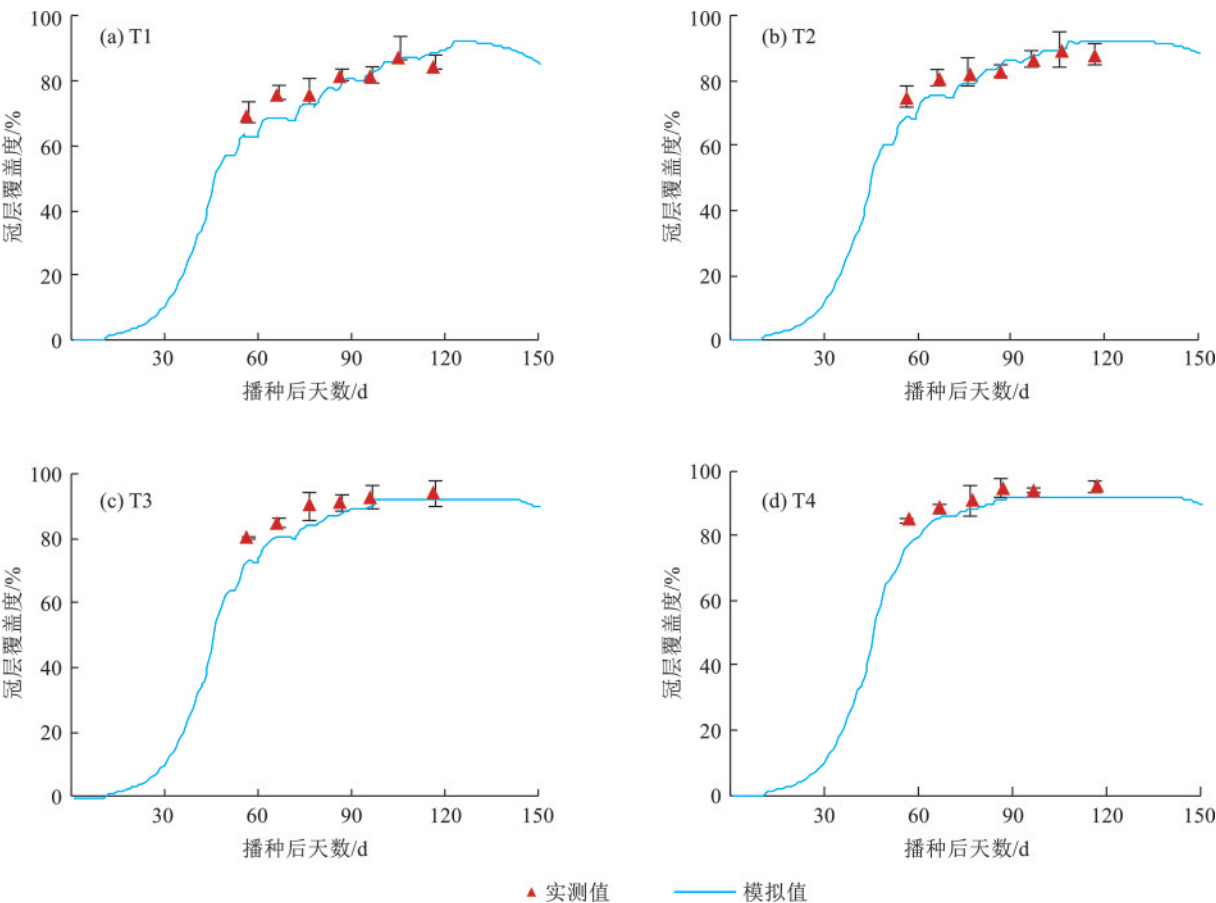


图 2 模型率定下冠层覆盖度实测值和模拟值对比
Fig. 2 Comparison of simulated and measured values of canopy coverage for model calibration

由图 3 可知，棉花生长过程中利用光合作用累积生物量，其各部分生理器官在同化作用的条件下进行生长发育，在播种后第 130 d 左右累计到最大值并趋于稳定。由表 5 可知，棉花地上部生物量不

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

同处理模拟值与实测值之间的 R^2 、 d 、RMSE 及 NRMSE 分别为 0.88~0.98、0.93~0.98、0.93~1.24 t/hm²和 8.73%~17.26%；所有处理的模拟值与实测值之间的 R^2 、 d 、RMSE 及 NRMSE 分别为 0.92、

0.96、1.04 t/hm²和 13.82%，生物量模拟值与实测值的增减趋势一致，模拟值能反映生物量在生育期内的变化过程，且生物量与灌水定额呈明显的正相关。

表 5 模型率定下精度指标
Table 5 Accuracy indicators for model calibration

指标	评价指标	T1	T2	T3	T4	所有处理
冠层覆盖度	R^2	0.93	0.94	0.97	0.94	0.90
	d	0.90	0.91	0.88	0.85	0.93
	RMSE/%	4.61	3.67	4.24	3.58	4.05
	NRMSE/%	5.77	4.37	4.74	3.91	4.69
地上部生物量	R^2	0.88	0.90	0.89	0.98	0.92
	d	0.93	0.95	0.95	0.98	0.96
	RMSE/(t·hm ⁻²)	1.17	0.93	1.24	0.74	1.04
	NRMSE/%	17.26	13.51	15.57	8.73	13.82
土壤水分体积分数	R^2	0.90	0.73	0.91	0.90	0.83
	d	0.96	0.93	0.98	0.97	0.95
	RMSE/%	0.67	1.18	1.23	2.34	1.49
	NRMSE/%	6.82	10.55	9.63	14.53	11.92

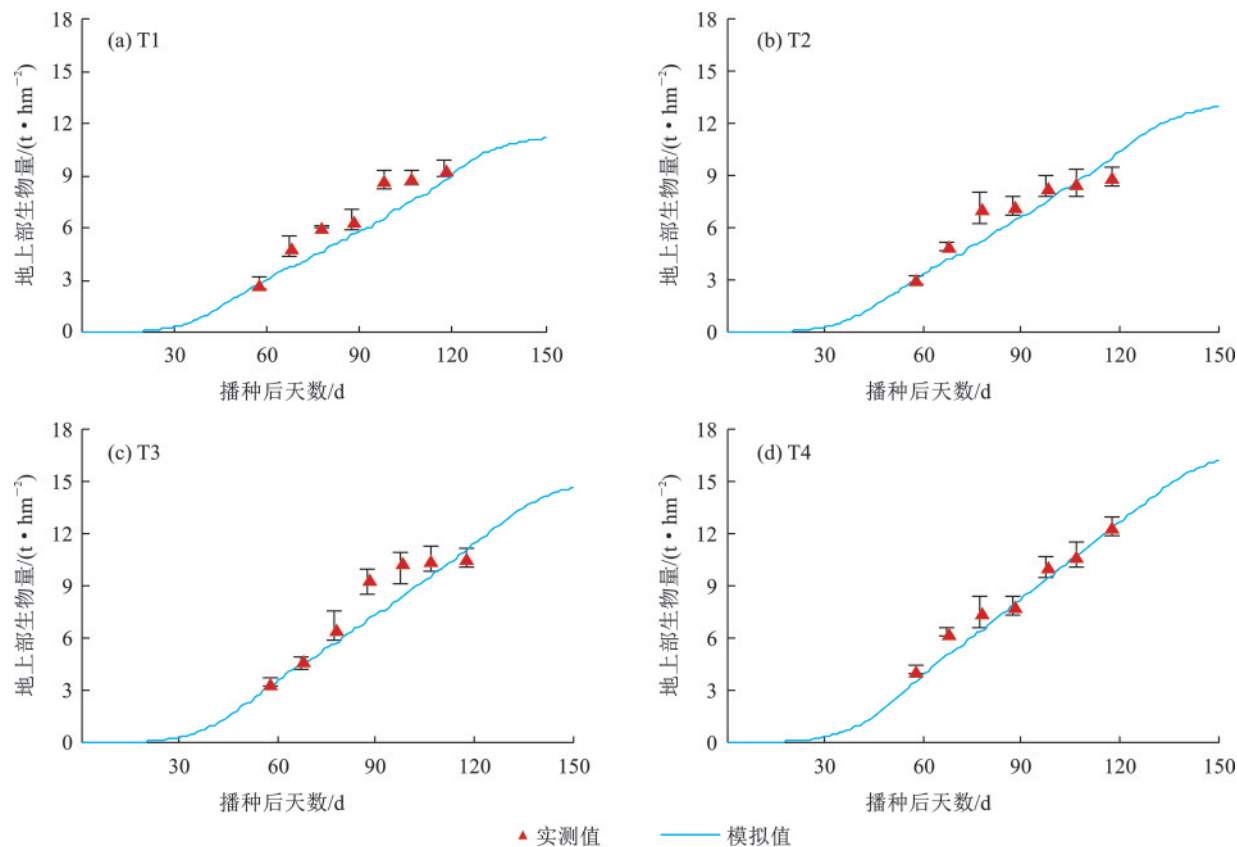


图 3 模型率定下棉花生物量实测值和模拟值对比
Fig. 3 Comparison of simulated and measured values of biomass for model calibration

由图 4 可见，土壤含水量的模拟值与实测值比较接近，土壤含水量随着灌水定额的增大而增加。由表 5 可知，不同处理土壤含水率模拟值与实测值之间的 R^2 、 d 、RMSE 及 NRMSE 分别为 0.73~0.91、0.93~

0.97、0.67%~2.34%、6.82%~14.53%；所有处理之间的 R^2 、 d 、RMSE 和 NRMSE 分别为 0.83、0.95、1.49% 和 11.92%。

由图 5 和表 5 可知，不同处理棉花籽棉产量实测

值与模拟值之间的 R^2 、 d 、RMSE 和 NRMSE 分别为 0.97、0.99、0.20 t/hm² 和 3.4%，模拟误差较小。可见，

经率定后对棉花的冠层覆盖度、生物量、土壤含水率和产量总体拟合度较好，各指标模拟精度都 > 82%。

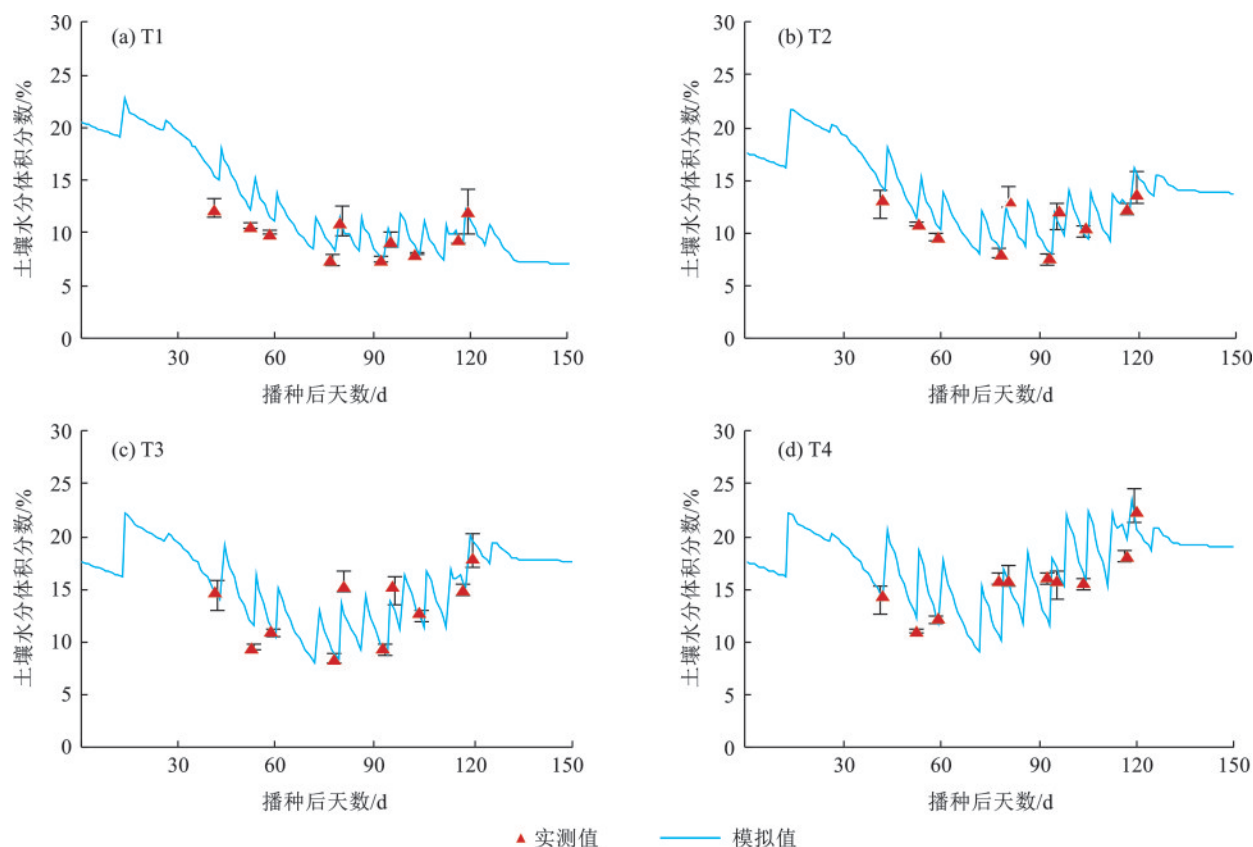


图4 模型率定下土壤水分体积分数实测值和模拟值对比

Fig. 4 Comparison of simulated and measured values of soil moisture for model calibration

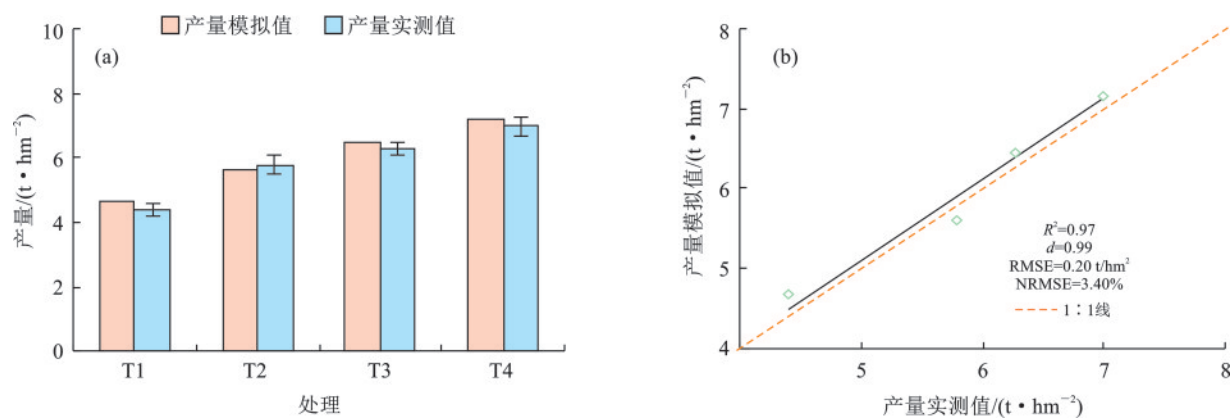


图5 模型率定下产量实测值和模拟值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and measured values of yield for model calibration

图6为2023年现状灌溉制度下模型验证得到的棉花生长状况调研数据实测值与模拟值对比,校验的统计参数见表6。各调研点冠层覆盖度模拟值与实测值之间的 R^2 、 d 、RMSE 及 NRMSE 分别为 0.90~0.93、0.63~0.92、0.86%~0.96%、0.90%~1.00%;所有调研点模拟值与实测值的 R^2 、 d 、RMSE 及 NRMSE 分别为 0.92、0.92、0.83%、0.87%。所有调研点生物量和产量模拟值与实测值之间的 R^2 均不小于 0.9, NRMSE 不大于 12.26%,模拟精度较好。各调研点

土壤含水率模拟值与实测值之间的 R^2 、 d 、RMSE 及 NRMSE 分别为 0.72~0.84、0.83~0.95、0.91%~1.65%、4.56%~8.03%;所有调研点模拟值与实测值之间的 R^2 、 d 、RMSE 及 NRMSE 分别为 0.74、0.92、1.40%、7.05%。所有调研点产量的模拟值与实测值之间的 R^2 、 d 、RMSE 及 NRMSE 分别为 0.97、0.89、0.20 t/hm²、2.84%,模拟值相比于实测值较高。针对所有调研点各指标模拟精度都 > 87%,进一步验证率定后各参数较为可靠。

综上,模型经校验后,膜下滴灌棉花冠层覆盖度、生物量、土壤含水率和产量模拟值与实测值之间的评价指标 R^2 均 ≥ 0.74 , NRMSE 均 $\leq 14.93\%$, 说

明经校验后的模型能较好地模拟膜下滴灌棉花水分与产量响应关系,可利用经校验模型开展南疆棉花灌溉制度优化研究。

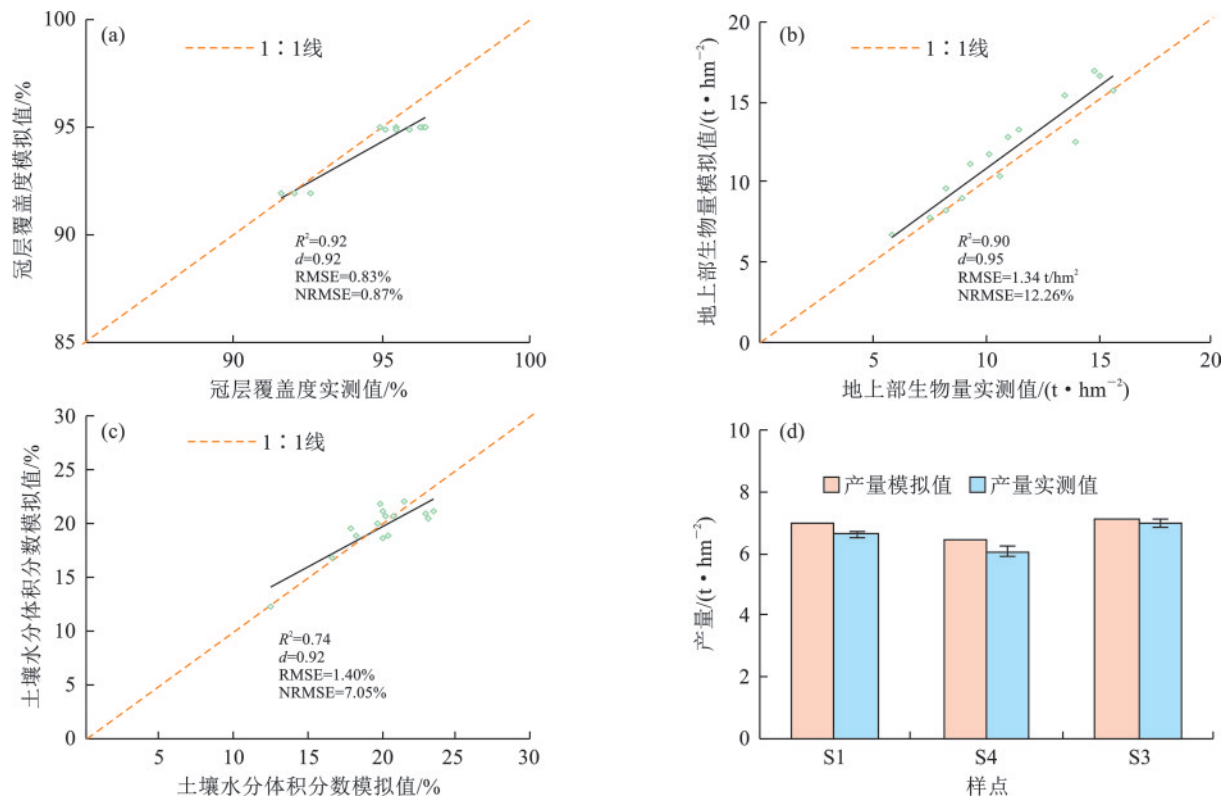


图 6 模型验证下各指标实测值与模拟值对比
Fig. 6 Comparison of simulated and measured values of each indicator for model verification

表 6 模型验证下精度指标					
Table 6 Accuracy indicators for model verification					
指标	评价指标	S1	S2	S3	所有样点
冠层覆盖度	R^2	0.91	0.93	0.90	0.92
	d	0.92	0.63	0.91	0.92
	RMSE/%	0.86	0.96	0.86	0.83
	NRMSE/%	0.90	1.00	0.91	0.87
地上部生物量	R^2	0.98	0.96	0.87	0.90
	d	0.94	0.93	0.96	0.95
	RMSE/(t·hm ⁻²)	1.39	1.45	1.16	1.34
	NRMSE/%	13.30	14.93	9.21	12.26
土壤水分体积分	R^2	0.84	0.72	0.80	0.74
	d	0.95	0.84	0.83	0.92
	RMSE/%	1.52	1.65	0.91	1.40
	NRMSE/%	8.03	7.99	4.56	7.05
产量	R^2				0.97
	d				0.89
	RMSE/(t·hm ⁻²)				0.20
	NRMSE/%				2.84

2.2 适宜灌水定额的确定

棉花根系主要活动层会随生育期发生动态变化,从苗期的 0.2 m 逐步扩展至花铃期的 0.8 m 左右^[16]。在膜下滴灌条件下,灌溉影响范围主要集中在 0~0.6 m 土层范围内^[17]。李少昆等^[18]对棉花根系分布的研究表明,在适宜灌溉下棉花根系根量的垂直分布呈现出自地表向下逐步增加的趋势,在 0~0.5 m 土层中的根量占比已达 90% 以上。当灌溉湿润范围覆盖足够比例的根量时,土壤水分在根系分布区域能形成相对稳定且适宜的水分环境,为棉花生长所需水分提供保障。综合膜下滴灌影响范围与棉花根系分布特征,本研究将 0~0.6 m 作为棉花的有效根系层深度。

南疆棉花生育期适逢用水高峰期,受渠系供水能力及水资源短缺等因素限制,农田灌溉以地表水轮灌为主,遵循统一申请、统一灌溉的原则,轮灌周期为 5~7 d^[19]。在兼顾南疆地表水轮灌周期实际情况,通过分析 24、30、36、45 mm 等不同灌水定额下棉花各生育期灌溉前及灌溉翌日土壤水分的入渗动态,以灌溉能否有效入渗至棉花主要根系分布层且渗漏损失较少为原则,确定膜下滴灌棉花的适宜灌水定额。

由图7可知,灌溉后各深度土层的土壤含水率增大,且增幅与灌水定额呈正相关。蕾期棉花根系主要分布在0~0.3 m,在灌溉量分别为24、30、36、45 mm的条件下,灌水翌日在0~0.3 m土层土壤水分体积分数分别增加2.9%、3.1%、5.0%和5.4%。在30、36、45 mm灌溉条件下,0.3~0.5 m土层土壤水分体积分数分别增加2.0%、2.7%和5.5%。24 mm灌溉条件下增加较少,在深层土壤的增加值较低,仅能在浅层土壤中提供有限的水分供给,在蕾期可以满足棉花生长需求;45 mm灌溉条件下,0.3~0.5 m土层的水量增加较多,超出棉花根系需水范围且存在深层渗漏风险。

花铃期棉花根系已扩展至0.8 m,但棉花根系仍主要分布在0~0.6 m。在灌溉量分别为24、30、36、45 mm的灌溉条件下,花铃期灌水翌日0~0.6 m土层土壤水分体积分数分别提升至11.1%、13.3%、15.4%和15.9%。灌水定额为36、45 mm的水分增量差异较小,当灌水定额为24、30 mm时,棉花主要根系层的土壤水分体积分数低于60%FC,棉花存在缺水风险。花铃期是棉花的关键生育期,缺水会抑制棉铃发育,导致棉花严重减产和品质下降,因此,花铃期大定额的灌溉有助于保证棉花生长的用水需求。

吐絮期随着灌水定额的增加,土壤水分分布的垂直距离增加,土壤湿润区域增大。与灌水前日相比,灌溉量分别为24、30、36、45 mm的灌溉条件下,土壤水分体积分数在0~0.6 m分别增加至11.5%、14.7%、18.1%和22.2%。当灌水定额<24 mm时,棉花灌水翌日主要根系层的土壤水分体积分数为51%FC,此时缺水易引发棉铃提前开裂,不仅限制铃重和纤维发育,而且会降低产量。当灌水定额为45 mm时,棉花灌水翌日主要根系层的土壤水分体积分数达99%FC,超出棉花用水需求,水分过大会导致棉铃贪青晚熟,影响采收。

综上所述,受制于南疆轮灌周期,在灌水定额不大于30 mm时,随着棉花需水增加,特别是在花铃期与吐絮期等需水关键期,会造成潜在缺水危机,不利于棉花正常生长;灌水定额达45 mm时,灌溉入渗超出棉花各生育期主要根系分布范围,渗漏损失风险增加;而灌水定额为36 mm时,灌水量入渗在主要根系分布范围内,该范围内土壤墒情能满足棉花各需水关键期水分供给需求。综合考虑各生育期棉花根系分布特征及其关键生育期需水要求,本研究确定36 mm为适宜的灌水定额。

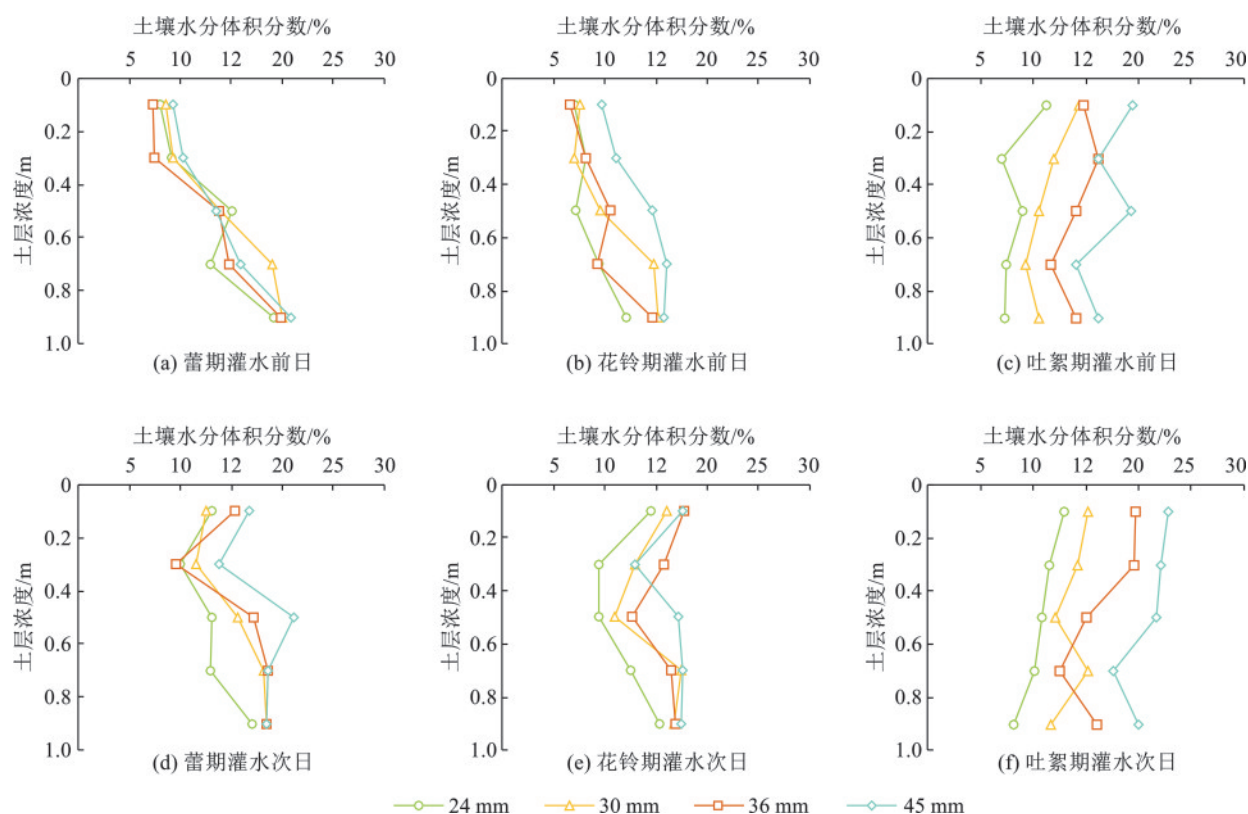


图7 棉花不同生育期各土层深度土壤含水量
Fig. 7 Soil moisture in different soil layers at different growth stages of cotton

2.3 膜下滴灌棉花灌溉制度优化

以研究确定的适宜灌水定额为基础,利用经校验后模型,模拟不同灌溉制度情景方案下棉花产量

与水分响应关系见表7。不同灌溉制度情景对产量和水分生产率的影响存在显著差异,棉花产量为5.875~7.476 t/hm²,水分生产率为1.177~1.272 kg/m³;

W1处理的产量最低,为 5.875 t/hm²,W6处理产量最高为 7.476 t/hm²;W4处理的水分生产率最小,达 1.177 kg/m³;W12处理的水分生产率最大,为 1.272 kg/m³。

在新疆干旱气候下,棉花收获后土壤储水量因蒸发而无效损耗。在灌溉量相同时,以产量最大作为灌溉制度优化标准;在灌溉量不同时,兼顾区域水资源紧缺实际情况下,以产量较高作为灌溉制度优化标准。当灌溉定额为 360 mm 时,其耗水量、产量、水分生产率分别为 498 mm、5.875 t/hm²、1.179 kg/m³。当灌溉定额为 396 mm 时,W2 为适宜灌溉制度,相应地其耗水量、产量、水分生产率分别为 534 mm、6.637 t/hm²、1.243 kg/m³。当灌溉定额为 432 mm 时,W11 为适宜灌溉制度,相应地其耗水

量、产量、水分生产率分别为 562 mm、7.082 t/hm²、1.260 kg/m³。在灌溉定额为 468 mm 时,W6 为适宜灌溉制度,其耗水量、产量及水分生产率分别为 594 mm、7.476 t/hm²、1.259 kg/m³。根据上述不同灌溉量选择相应的适宜灌溉制度,在水资源紧缺情况下,蕾期土壤水分阈值下限可适度降低至 60%FC,花铃期土壤水分阈值下限不低于 65%FC,而吐絮期土壤水分阈值下限可降低至 55%FC,如 W2;在水资源限制不明显情况下,建议选择 W6,蕾期、花铃期及吐絮期的土壤水分阈值下限分别为 70%FC、75%FC、55%FC。根据不同灌溉定额下的适宜灌溉制度及其对应适宜土壤水分下限表明,花铃期和蕾期为棉花需水关键期,而吐絮期为棉花非需水关键期。

表 7 不同灌溉制度情景下棉花水分与产量响应关系

Table 7 Response relationships between cotton water use and yield under different irrigation schedule scenarios

模拟情景	生育期土壤水分下限/%FC			灌溉定额 /mm	灌水次数	ET/mm	产量/ (t·hm ⁻²)	水分生产率/ (kg·m ⁻³)
	蕾期	花铃期	吐絮期					
W1	50	65	55	360	10	498	5.875	1.179
W2	60	65	55	396	11	534	6.637	1.243
W3	70	65	55	432	12	559	7.028	1.257
W4	50	75	55	396	11	533	6.269	1.177
W5	60	75	55	432	12	568	7.061	1.244
W6	70	75	55	468	13	594	7.476	1.259
W7	50	80	55	432	12	561	6.673	1.189
W8	60	80	55	468	13	593	7.430	1.254
W9	70	80	55	468	13	585	7.329	1.253
W10	50	65	75	396	11	527	6.304	1.196
W11	60	65	75	432	12	562	7.082	1.260
W12	70	65	75	468	13	584	7.431	1.272
W13	50	75	75	432	12	560	6.678	1.192
W14	60	75	75	468	13	591	7.447	1.260

3 讨论

3.1 适宜灌水定额的合理性

在棉花灌水定额相关研究中,刘新永等^[20]研究指出,在充分灌溉下棉花蕾期、花铃期、盛铃期的灌水定额分别为 40、50、35 mm;范军亮等^[21]在南疆棉花产量品质和水肥利用效率研究中采用 30~50 mm 的灌水定额;南疆现状灌溉制度调查成果中,现状灌水定额在 28~47 mm(表 1)。本研究表明,因受制于示范区在棉花生育期来水量多寡及其相应渠道供水能力,考虑现状 5~7 d 轮灌周期实际情况,采用 36 mm 定额在灌水翌日在垂直剖面上土壤湿润了主要根系范围内,呈现先增大后减小的典型分布特征,与 CHEN 等^[22]揭示的根区水分空间分布规律一致。同

时,有研究^[23]表明,37.5 mm 灌水定额有助于减少盐分积累。可见,灌水定额为 36 mm 与现状灌水定额范围内相符合,且能满足棉花蕾期、花铃期及吐絮期等各个生育时段需水要求,在有效淋洗根区土壤盐分的同时,还可以降低渗漏损失的风险。

3.2 考虑土壤水分适宜下限阈值的灌溉制度优化

南疆是棉花的主产区,为应对新疆严峻的水资源短缺形势,棉花各生育阶段土壤水分适宜下限阈值研究一直是广大学者关注的重点研究方向。李彦等^[24]以棉花产量和水分利用效率较高为评价标准,得到棉花蕾期、花铃期及吐絮期适宜的土壤水分下限阈值分别为 65%~70%FC、75%~85%FC、55%~65%FC;申孝军等^[25]研究表明,30 mm 定额下花铃期灌水下限 75%FC 的灌溉设置更加高效;齐文婷等^[26]

通过分析不同土壤水分下限阈值下新疆棉花光合效率及产量形成机制表明,棉花蕾期、花铃期的适宜土壤水分下限阈值均为70%~75%FC;HE等^[27]虽建议南疆棉花种植土壤水分下限为75%FC,但对棉花整个生育期仅界定单一水分下限,可能因忽视不同生育期需水差异而造成水分浪费。综合来看,本研究确定的棉花适宜土壤水分下限阈值与上述研究结果基本相符,同时结合区域水资源差异,细化了南疆棉花各生育时段的适宜土壤水分下限阈值,为区域不同水资源条件下棉花水分精准管理提供明确依据。

从水分调控机制来看,各生育期水分下限阈值对棉花生长的影响存在显著差异。蕾期是棉花生长和发育的并进时期,耗水量逐渐增加。在W1~W3情景下,当花铃期和吐絮期水分下限不变,蕾期水分下限由50%FC提高至70%FC时,产量增幅达19.6%,但若维持50%FC,产量在5.875~6.678 t/hm²,相较于其他情景产量较低,说明50%FC的下限可能因水分胁迫限制棉花后期生长潜力,提升蕾期水分下限可为棉花前期生长和结铃储备奠定基础。花铃期历时较长,是棉铃发育和纤维形成的核心阶段,对水分胁迫最敏感,由W3、W6和W9情景可知,在其他生育阶段土壤水分下限阈值保持不变时,花铃期水分下限从65%FC升至75%FC,产量增幅达6.3%,WUE提高0.003 kg/m³,但进一步提升花铃期土壤水分下限阈值至80%时,棉花产量降低1.6%,反而因灌溉量增加,引发边际效益递减,说明花铃期存在最优水分阈值区间,过高的灌水下限会造成水资源浪费和棉花减产。吐絮期棉花生理活动衰退,耗水量减少,当蕾期和花铃期水分下限不变,吐絮期的土壤水分下限阈值由55%FC提升至65%FC时,棉花产量增加有限,相较于蕾期与花铃期,吐絮期对水分调控敏感性显著降低,产量效益超过耗水量增加的成本,甚至CHEN等^[28]研究表明,棉花吐絮期适度水分亏缺有利于稳产。由于棉花吐絮期为非需水关键期,下限控制在55%~65%FC时可满足基本稳产需求。

与现状灌溉定额相比,W2和W6均在灌溉定额的适宜范围内,且产量分别增加9.6%和19.7%,与WANG等^[29]发现的495 mm灌溉水平下棉花产量未显著下降且水分利用效率较高的结果一致,也符合LI等^[30]在砂壤土条件下推荐450~500 mm灌水量能达成水资源效率与棉花产量、品质协同提升的目标。因此,在水资源紧缺情况下,建议选择W2作为优化灌溉制度;在水资源限制不明显情况下,建议选择W6作为优化灌溉制度,通过保障需水关键期的水分供给,为提高棉花产量提供实践指导。

4 结论

1)利用实测试验数据对模型参数进行本地化,不同条件下的棉花生长及水分指标模拟值与实测值之间的统计参数可同时达到决定系数不小于0.7、标准均方根误差不大于17.26%,能够较好地模拟南疆棉花生长与水分响应关系。

2)以研究确定的南疆棉花膜下滴灌适宜灌水定额为36 mm为基础,提出在水资源紧缺条件下建议棉花蕾期、花铃期及吐絮期的土壤水分下限分别为60%FC、65%FC、55%FC;在水资源状况限制不明显情况下,蕾期、花铃期及吐絮期的土壤水分阈值下限分别为70%FC、75%FC、55%FC。

参考文献:

- [1] 贺晋云,张明军,王鹏,等.新疆气候变化研究进展[J].干旱区研究,2011,28(3):499-508.
HE J Y, ZHANG M J, WANG P, et al. New progress of the study on climate change in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 499-508.
- [2] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2024.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024.
- [3] CHEN H X, ZHAO X X, HAN Y C, et al. Competition for light interception in cotton populations of different densities[J]. Agronomy, 2021, 11(1): e176.
- [4] 刘传迹,金晓斌,徐伟义,等.2000—2020年南疆地区棉花种植空间格局及其变化特征分析[J].农业工程学报, 2021, 37(16): 223-232.
LIU C J, JIN X B, XU W Y, et al. Analysis of the spatial distribution and variation characteristics of cotton planting in southern Xinjiang from 2000 to 2020 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(16): 223-232.
- [5] 胡宏昌,田富强,张治,等.干旱区膜下滴灌农田土壤盐分非生育期淋洗和多年动态[J].水利学报,2015,46(9):1037-1046.
HU H C, TIAN F Q, ZHANG Z, et al. Soil salt leaching in non-growth period and salinity dynamics under mulched drip irrigation in arid area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1037-1046.
- [6] 孙兆强.膜下滴灌技术在中西部地区农田灌溉中的运用研究[J].黑龙江水利科技,2020,48(4):158-160.
SUN Z Q. Study on application of drip irrigation under mulch technology in farmland irrigation in central and western China [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020, 48(4): 158-160.
- [7] 崔永生,王峰,孙景生,等.南疆机采棉田灌溉制度对土壤水盐变化和棉花产量的影响[J].应用生态学报, 2018, 29(11): 3634-3642.
CUI Y S, WANG F, SUN J S, et al. Effects of irrigation regimes on the variation of soil water and salt and

- yield of mechanically harvested cotton in southern Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(11):3634-3642.
- [8] 范雅君, 吕志远, 田德龙, 等. 河套灌区玉米膜下滴灌灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1):123-129.
FAN Y J, LU Z Y, TIAN D L, et al. Irrigation regime for corn production with drip irrigation and plastic mulching in Hetao irrigation region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1):123-129.
- [9] 杜江涛, 张楠, 龚珂宁, 等. 基于DSSAT模型的南疆膜下滴灌棉花灌溉制度优化[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11):3760-3768.
DU J T, ZHANG N, GONG K N, et al. Optimization of cotton irrigation schedule under mulch drip irrigation in southern Xinjiang based on DSSAT model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(11):3760-3768.
- [10] 苑蒙飞, 徐利岗, 窦家恒, 等. 基于土壤水分下限的设施番茄适宜灌溉控制指标试验[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6):1239-1248.
YUAN M F, XU L G, DOU J X, et al. Experiment on optimal irrigation control indicators for greenhouse tomatoes based on soil moisture threshold[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2024, 22(6):1239-1248.
- [11] HUANG C, ZHANG Y Y, LIU X C, et al. Post-anthesis water use and biomass accumulation in winter wheat under subsoiling and microsprinkler irrigation[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 246:e106343.
- [12] 汪思佳, 王春霞, 张景瑞, 等. 减氮条件下基于AquaCrop模型的北疆膜下滴灌棉花水氮制度优化[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3):314-324.
WANG S J, WANG C X, ZHANG J R, et al. Optimization of water and nitrogen regime based on AquaCrop model for drip irrigation cotton under nitrogen reduction conditions in northern Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):314-324.
- [13] 王洪博, 李国辉, 徐雪雯, 等. 基于AquaCrop模型评估气候变化下棉花生产的可持续性[J]. 中国农业气象, 2023, 44(7):588-598.
WANG H B, LI G H, XU X W, et al. Assessing the sustainability of cotton production under climate change based on the AquaCrop model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2023, 44(7):588-598.
- [14] 张东风, 宋美珍, 王海娟, 等. 新疆棉花“宽早优”和“矮密早”种植模式浅析[J]. 中国棉花, 2025, 52(7):27-31.
ZHANG D F, SONG M Z, WANG H J, et al. Analysis of the "Kuanzaoyou" and "Aimizao" planting pattern for Xinjiang cotton[J]. China Cotton, 2025, 52(7):27-31.
- [15] 王芳圆. 种植密度和行距对机采棉产量形成及脱叶催熟的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2025.
WANG F Y. Effects of planting density and row spacing on yield formation and defoliation of machine-picked cotton[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2025.
- [16] 王立志, 何帅, 李东伟. 膜下滴灌滴水流量对棉花根系分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(3):153-161.
WANG L Z, HE S, LI D W. Effects of drip flow rate of mulched drip irrigation on root distribution of cotton[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(3):153-161.
- [17] 宁松瑞, 左强, 石建初, 等. 新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22):90-99.
NING S R, ZUO Q, SHI J C, et al. Water use efficiency and benefit for typical planting modes of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(22):90-99.
- [18] 李少昆, 王崇桃, 汪朝阳, 等. 北疆高产棉花根系生长规律的研究 I 根系的构型与动态建成[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 1999, 17(增刊1):15-25.
LI S K, WANG C T, WANG C Y, et al. Studies on the root growth of high-yield cotton in north Xinjiang I. the distributing pattern and construction of root system[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 1999, 17(S1):15-25.
- [19] 弋鹏飞, 虎胆·吐马尔白, 王一民, 等. 干旱区棉花膜下滴灌优化灌溉制度的试验研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(1):53-57.
YI P F, HUDAN T, WANG Y M, et al. Schedule optimization of under-plastic-mulch drip irrigation for cotton in arid areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(1):53-57.
- [20] 刘新永, 田长彦, 马英杰, 等. 南疆膜下滴灌棉花耗水规律以及灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1):108-112.
LIU X Y, TIAN C Y, MA Y J, et al. Water consumption characteristics and scheduling of drip irrigation under plastic film for cotton in south Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(1):108-112.
- [21] 范军亮, 白振涛, 李云霞, 等. 灌水施氮和缩节胺用量对南疆棉花产量品质和水肥利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(9):68-78.
FAN J L, BAI Z T, LI Y X, et al. Effects of irrigation amount, nitrogen rate and mepiquat chloride dose on cotton yield, quality and water-fertilizer use efficiency in southern Xinjiang of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(9):68-78.
- [22] CHEN W L, JIN M G, FERRÉ T P A, et al. Spatial distribution of soil moisture, soil salinity, and root density beneath a cotton field under mulched drip irrigation with brackish and fresh water[J]. Field Crops Research, 2018, 215:207-221.